



## **Recursos e Restrições nas explicações de futuros professores de física sobre mecânica quântica**

### **Affordances and constraint in the explanations of pre-service physics teachers on quantum mechanics**

**Alexsandro Pereira de Pereira**

PPG Ensino de Física/ Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
alexsandro.pereira@ufrgs.br

**Fernanda Ostermann**

Instituto de Física – Departamento de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
fernanda@if.ufrgs.br

#### *Resumo*

Nesse trabalho, apresentamos um estudo sobre o papel da mediação textual no ensino de ciências. Esse estudo traz resultados preliminares de uma tese de doutorado, ainda em andamento, que investiga a formação inicial de professores de física em mecânica quântica. A metodologia adotada no presente estudo consiste na análise do discurso de um grupo de licenciandos em física, conforme eles respondem a um teste escrito sobre física moderna. O objetivo é analisar o modo como “recursos textuais” disponíveis nesse contexto institucional moldam as explicações de futuros professores de Física sobre mecânica quântica. Os resultados da análise mostraram que os recursos textuais empregados pelos estudantes oferecem sérias restrições à formulação de uma resposta adequada ao problema proposto pelo professor. Essas restrições parecem estar relacionadas aos múltiplos objetivos associados à tarefa em questão.

#### **Palavras chaves**

Mediação textual, recursos e restrições, abordagem sociocultural, ensino de física quântica.

### **Abstract**

In this paper, we present a study on the role of textual mediation in science teaching. This study comes up with some preliminary outcomes from an ongoing doctoral thesis, which investigates the teaching of quantum mechanics in the training of high school physics teachers. The methodology used in this paper is based on the analysis of discourse of a group of undergraduate students as they answer a written test on modern physics. The aim of this study is to examine how “textual resources” provided by this institutional context shape the explanations of pre-service physics teacher on quantum mechanics. The outcomes of this study have shown that the textual resources employed by the students have seriously constrained the formulation of a proper response to the problem posed by the teacher. These constrains seem to be related to multiples goal associated with the task itself.

### **Key words**

Textual mediation, affordances and constraint, sociocultural approach, teaching of quantum physics.

## **Introdução**

Em *Voices of Collective Remembering*, James V. Wertsch (2002) narrou um episódio no qual ele passou um dia em Moscou observando diversas aulas em uma escola de ensino médio conhecida pelos seus fortes estudantes e excelente instrução. Nessa ocasião, ele teve a oportunidade de engajar alguns alunos do décimo primeiro ano em uma discussão sobre a segunda guerra mundial e ele perguntou sobre o papel que os Estados Unidos desempenharam nesse conflito. Em resposta a essa questão, um estudante de dezesseis anos, Sasha, disse que os Estados Unidos não contribuíram como um aliado porque eles ganharam muito dinheiro vendendo armas para países durante os primeiros anos da guerra e também se recusaram a abrir uma segunda frente de batalha em 1942 e em 1943. Além disso, ele disse que foi somente depois que os Estados Unidos começaram a pensar que a União Soviética poderia vencer a guerra sozinha e dominar a Europa pós-guerra que eles ficaram suficientemente preocupados em entrar no conflito, abrindo uma segunda frente de batalha em 1944.

De acordo com Wertsch, o mais surpreendente com relação à resposta de Sasha é a maneira com que ele falou sobre esses eventos. Ele se apresentou de maneira segura e confiante, demonstrando pouca dúvida ou hesitação. Foi como se ele próprio tivesse sido uma testemunha ocular do que aconteceu. Uma primeira questão que surge desse episódio é a seguinte: como ele, um estudante de dezesseis anos de idade, pode ter tanta certeza do que ele disse? Afinal de contas, ele não era nem mesmo nascido até aproximadamente quatro décadas após a segunda guerra mundial ter acabado. Uma segunda questão pertinente, nesse caso, é a seguinte: de onde ele tirou essa descrição do passado? Até onde é possível averiguar, seus comentários sobre a segunda guerra mundial difere substancialmente da história oficial ensinada nos Estados Unidos e em outros países do Ocidente.

Uma óbvia conclusão desse episódio é a de que os russos têm sua própria versão oficial da história e estudantes como Sasha têm aprendido sobre ela na escola, em casa, na mídia e assim por diante. Entretanto, o fato de nenhum estudante da geração de Sasha ter testemunhado esse conflito aponta para uma importante característica do ensino de história: a de que não temos acesso direto aos eventos propriamente ditos, mas apenas a algumas narrativas sobre eles. Isso implica o fato de que o aprender história invariavelmente toma a forma de dominar textos narrativos sobre quem fez o que para quem, por qual motivo e em que contexto, e há poucas razões para duvidar de que esse foi modo pelo qual Sasha desenvolveu sua descrição do passado.

Neste trabalho, defendemos a tese de que a mesma linha de raciocínio, usado para analisar o episódio de Sasha, pode ser aplicada ao ensino de ciências. Em um importante sentido, nem professores nem estudantes têm acesso direto às “entidades inobserváveis” (HACKING, 1983) que as teorias científicas postulam (átomos, genes, fótons, elétrons, etc.), mas apenas a certas *explicações* dessas entidades –textos explicativos sobre “o que elas podem fazer, o que você pode fazer para elas e do que elas são feitas” (OGBORN et al., 2006). Assim, aprender ciências torna-se uma questão de dominar “recursos textuais” fornecidos por outros<sup>1</sup>, isto é, explicações (orais ou escritas) que estabelecem, ou mediam, a relação entre os fenômenos propriamente ditos e o nosso entendimento sobre eles.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o papel da mediação textual no ensino de ciências. Esse estudo faz parte de um projeto mais amplo que investiga a formação inicial de professores de física em mecânica quântica. As questões discutidas nesse trabalho são resultados preliminares de uma tese de doutorado ainda em andamento. A metodologia adotada no presente estudo consiste na análise do discurso de um grupo de licenciandos em física, conforme eles respondem a um teste escrito sobre física moderna. O objetivo é analisar como “recursos textuais” disponíveis nesse contexto institucional moldam as explicações de futuros professores de Física sobre mecânica quântica. Nossa análise fundamenta-se na abordagem sociocultural de James V. Wertsch. Partimos do pressuposto de que falar e pensar cientificamente implica empregar textos explicativos da ciência, que são fornecidos por outros em um cenário sociocultural específico. Os resultados da análise mostraram que os recursos textuais empregados pelos estudantes oferecem sérias restrições à formulação de uma resposta adequada ao problema proposto pelo professor. Essas restrições parecem estar relacionadas aos múltiplos objetivos associados à tarefa em questão.

## Referencial teórico: a análise sociocultural de Wertsch

O presente trabalho fundamenta-se na análise sociocultural proposta por James V. Wertsch (1991, 1998). O objetivo da análise sociocultural consiste em compreender como os processos mentais humanos estão relacionados com o contexto cultural,

---

<sup>1</sup> Essa definição é uma simplificação. A aprendizagem envolve a formação de um plano interno de funcionamento a partir da interação social e do domínio de mecanismos semióticos, especialmente a linguagem, que mediam o funcionamento social e, posteriormente, o individual.

histórico e institucional. Um pressuposto básico dessa abordagem é a afirmação de que o que deve ser descrito e explicado é a “ação” humana. Da forma definida por Wertsch, a ação pode ser externa ou interna, e pode ser conduzida tanto por grupos (pequenos ou grandes) como por indivíduos.

Uma forma de ação humana de particular interesse para análise sociocultural é a “ação mediada”. A ênfase na mediação deriva dos escritos de Vygotsky (1987, 1994) sobre o desenvolvimento das funções humanas e constitui o aspecto central da análise sociocultural. Isso porque a ação humana tipicamente emprega “ferramentas culturais”, ou “modos de mediação”, que estão disponíveis em um cenário sociocultural particular. Essas ferramentas culturais, tais como a linguagem e os instrumentos de trabalho, moldam a ação humana de maneira essencial. E devido ao fato de que essas ferramentas são fornecidas por um cenário sociocultural particular, a ação humana é inerentemente “situada” em um contexto cultural, histórico e institucional.

Um pressuposto básico da análise sociocultural é a afirmação de que a ação humana envolve uma “tensão irreduzível” entre os agentes e as ferramentas culturais que eles empregam. Essa formulação está no núcleo da análise sociocultural e nos obriga a ir além do agente individual para compreender as forças que configuram a ação humana. Mais do que isso, essa formulação sugere que qualquer tentativa de reduzir a ação humana a um de seus elementos (agente ou ferramenta cultural) corre o risco de destruir o fenômeno em observação. Isso não significa que a ação humana não envolva uma dimensão psicológica individual. Ela certamente envolve. A questão é que isso deve ser pensado como um “momento” da ação e não como um processo separado ou como uma entidade que de alguma forma existe em isolamento. Ao invés de assumir que um agente, sozinho, é responsável pela ação, é mais apropriado falar de “agentes-agindo-com-ferramentas-culturais”. Essa descrição permite fornecer uma resposta mais adequada à pergunta “quem está realizando a ação?”. Ou, no caso discurso, “quem está realizando o discurso?”.

Para ilustrar a irreduzível tensão entre agentes e ferramentas culturais, considere um exemplo relativo ao ensino de matemática básica. Um estudante é solicitado a multiplicar 484 por 22. Após realizar a multiplicação, ele encontra corretamente o resultado 10648. Para justificar sua resposta, o estudante mostra para o professor o seu cálculo, realizado mais ou menos da seguinte maneira:

$$\begin{array}{r} 484 \\ \times 22 \\ \hline 968 \\ + 968\text{—} \\ \hline 10648 \end{array}$$

Uma questão fundamental, nesse caso, é: quem realizou a multiplicação? À primeira vista, a resposta adequada parece ser “o estudante”, uma vez que um agente ativo teve que estar envolvido para conduzir a operação. No entanto, uma análise mais cuidadosa pode revelar a presença de um dispositivo semiótico, materializado na forma de números agrupados segundo uma disposição espacial particular. Tal observação parece sugerir que talvez esse formato gráfico vertical dos números deva receber os créditos pela multiplicação. Mas esse formato gráfico, por si só, é incapaz de fornecer o resultado da multiplicação. É necessário que um agente, familiarizado

com a ferramenta cultural em questão, possa manipulá-la de maneira adequada para obter o resultado correto. Assim, do ponto de vista da ação mediada, ambos os elementos (o agente e a ferramenta cultural) estavam envolvidos num sistema de operação distribuída, de modo que a resposta mais adequada à questão formulada acima é: o estudante atuando junto com a disposição vertical dos números.

Para esclarecer melhor esse ponto, considere que o mesmo estudante seja solicitado a repetir a operação sem utilizar a disposição vertical dos números. Tal operação seria muito mais difícil – e dependendo dos números envolvidos, até impossível – de se realizar. Isso porque a maioria das pessoas instruídas é suficientemente hábil para multiplicar 2 por 4, 2 por 8 e assim por diante, mas não para multiplicar 484 por 22 diretamente. A disposição vertical dos números permite reduzir um problema complexo em uma série de operações concretas com as quais os agentes sabem lidar. Isto significa que

*a organização espacial – ou sintaxe – dos números é, nesse caso, parte essencial de uma ferramenta cultural sem a qual não podemos resolver esse problema. Em um importante sentido, portanto, esta sintaxe realiza parte do pensamento (WERTSCH, 1998, p. 29, nossa tradução).*

A partir dessa perspectiva, qualquer forma de ação humana se torna muito difícil, ou até impossível, de se realizar se nela não estiver envolvida uma poderosa ferramenta cultural e um agente habilidoso no seu manuseio. A natureza da ferramenta cultural e o uso específico que é feito dela podem variar consideravelmente. Ainda sim, ambos os elementos são necessários para a compreensão da ação humana.

## Contribuições da análise sociocultural para o ensino de ciências

Construindo a partir das ideias de Wertsch, delineamos uma abordagem “distribuída” para o ensino de ciências. Essa abordagem está centrada em como “recursos textuais” (WERTSCH, 2002), especialmente explicações científicas, configuram esse processo. O conceito de “texto explicativo” que estamos propondo é análogo à noção de narrativas usada por Wertsch (1998) no estudo da memória coletiva. O termo “texto” – que pode ser escrito ou oral – deriva dos trabalhos de Mikhail M. Bakhtin (1986) e é visto como a unidade básica de organização que estrutura significado, comunicação e pensamento.

O pressuposto básico de nossa abordagem consiste na tese de que pensar e falar cientificamente implica empregar textos explicativos fornecidos por outros. Esses textos têm um histórico de uso por parte de outros falantes e, em virtude disso, traz consigo suas perspectivas gerais ou visões de mundo que Bakhtin (1981) define como “voz”. Isso não significa que os textos explicativos determinam mecanicamente nosso discurso, mas sua influência é poderosa e precisa ser reconhecida e examinada. A partir dessa perspectiva, o conhecimento científico é visto como “distribuído” entre agentes e fontes textuais e o desafio consiste em olhar para esses textos e para as vozes por trás deles, assim como para as vozes de determinados agentes empregando esses textos em um determinado contexto.

Uma clara evidência da mediação textual no ensino de ciências reside no fato de que, na maioria dos casos, as explicações fornecidas por professores e alunos em sala de aula não são o resultado de pesquisa independente. Ao invés disso, elas fazem parte

de um “kit de ferramentas” (WERTSCH, 1991) disponível em um cenário sociocultural particular. A partir dessa perspectiva, portanto, aprender ciências significa dominar as explicações científicas que são fornecidas por professores e colegas em uma determinada instituição de ensino. Isso não significa que os indivíduos envolvidos simplesmente repetem as explicações científicas de maneira irracional. Pelo contrário, eles geralmente são bem capazes de justificar suas explicações, reformulando-as e acrescentando novas informações. Isso mostra que as fontes textuais usadas no ensino de ciências não tomam a forma de instrumentos rígidos que são usados na sua forma imutável e em sua totalidade ou são rejeitados. Ao invés disso, eles representam uma forma muito mais flexível de ferramenta cultural que pode ser usada em combinação com outras para gerar novos argumentos.

A noção de textos explicativos que temos em mente se enquadra na categoria de “mediação implícita”, definida por Wertsch (2007). Essa categoria envolve sistemas de signos, especialmente a linguagem natural, cuja função primordial é a comunicação. Assim, ao contrário da mediação explícita que é intencionalmente introduzida na atividade com o propósito de organizá-la, as formas de mediação implícita já fazem parte do fluxo de ação comunicativa pré-existente que é posto em contato com outras formas de ação humana. Além disso, na mediação explícita a materialidade dos instrumentos mediadores tende a ser óbvia e não-transitória. Já no caso da mediação implícita, as formas de mediação costumam ser menos evidente e, portanto, mais difícil de detectar. Em virtude disso, ferramentas culturais como os textos explicativos são dificilmente tomados como objetos de reflexão consciente e manipulação. Essa característica é um exemplo daquilo que Wertsch (2002) chamou de “transparência” da linguagem. Parafraseando Wertsch, é como se olhássemos para os recursos textuais que empregamos e não pudéssemos vê-los ou apreciar o modo como eles moldam o que dizemos e pensamos.

Essa perspectiva sugere a necessidade de tornar visível a mediação textual e compreender o papel que ela desempenha no processo de ensino e aprendizagem em ciências. Isso implica analisar as formas específicas em que a mediação assume nesse contexto, especialmente as explicações científicas. No presente trabalho, nosso objetivo consiste em analisar o modo como os textos explicativos da mecânica quântica são usados, ou consumidos, por um grupo de licenciandos em física em uma atividade de resolução de problemas. O desafio consiste em examinar como os estudantes coordenam suas vozes com aquelas que estão por trás dos recursos textuais que eles empregam.

## Dimensões de análise: propriedades da ação mediada

Em *Mind as Action*, Wertsch (1998) delineou dez formulações básicas que caracterizam a ação mediada e as ferramentas culturais utilizadas pelos agentes. No presente estudo, daremos destaque a três propriedades da ação mediada como possíveis dimensões analíticas a serem utilizadas no exame das transcrições dos enunciados produzidos pelos estudantes.

## Múltiplos objetivos da ação

A primeira propriedade a ser considerada no presente estudo é a noção de que a ação mediada tem tipicamente múltiplos objetivos simultâneos. Essa afirmação normalmente contrasta com outras abordagens na qual a primeira suposição é a ideia que a ação humana se organiza em torno de um objetivo único e facilmente identificável. De acordo com Wertsch, a ação mediada costuma servir a vários propósitos, muitos dos quais podem estar em conflito um com o outro.

Para ilustrar a afirmação acima, considere novamente o exemplo da multiplicação. Um dos objetivos de se multiplicar 484 por 22 é obter o resultado correto. No entanto, para incluir a noção de objetivo no estudo da ação mediada é necessário levar em conta o fato de que as ferramentas culturais servem a determinados propósitos. Se o professor tivesse pedido para o estudante multiplicar 484 por 22 utilizando números romanos ao invés de números arábicos, os objetivos do agente entrariam em conflito com os recursos proporcionados pela ferramenta cultural utilizada uma vez que os propósitos originais associados aos números romanos não incluem a multiplicação. Na perspectiva da análise sociocultural, a ação mediada tem múltiplos objetivos simultâneos porque os objetivos do agente não se ajustam com precisão aos objetivos associados aos diferentes modos de mediação.

## Recursos e restrições

Uma segunda propriedade da ação mediada é a afirmação de que as ferramentas culturais restringem ao mesmo tempo em que possibilitam a ação. De acordo com Wertsch, os estudos em psicologia tendem a centrar-se no potencial dos meios mediacionais para facilitar a ação humana. Vygotsky (1987, 1994), por exemplo, descreveu o modo como o desenvolvimento da linguagem na ontogênese oferece novas possibilidades de consciência humana. Já as teorias sobre desenvolvimento cognitivo têm formulado seus estudos em termos de como sofisticadas formas de mediação – frequentemente descritas em termo de “representações” – possibilitam formas de operações mais complexas (WERTSCH, 1985). A idéia geral é que mesmo quando uma ferramenta cultural liberta os agentes de algumas limitações prévias, ela introduz outras novas que lhe são próprias.

Um exemplo dessa propriedade pode ser ilustrado a partir do uso de gráficos no contexto do ensino de matemática. Aprender a lidar com um conjunto de dados a partir de observações empíricas, empregando uma determinada técnica de representação gráfica, nos ajuda a perceber padrões que de outra forma não seriam detectados. No entanto, esse mesmo processo também implica sermos menos capazes de enxergar outros padrões que poderiam ser revelados através do emprego de outras formas de mediação.

## Capacidade transformatória

Uma terceira formulação de Wertsch consiste na afirmação de que novas ferramentas culturais transformam a ação mediada. Essa propriedade deriva dos escritos de Vygotsky (2004) acerca do método instrumental. Na perspectiva da ação mediada, a introdução de uma nova ferramenta cultural na ação cria uma espécie de desequilíbrio na sua organização sistemática que provoca mudanças no agente e na ação mediada como um todo. Isto não significa que a única forma de introduzir mudanças seja

através de novas ferramentas culturais. Em muitos casos, as mudanças podem ser atribuídas a diferentes níveis de habilidade ou outros aspectos relacionados aos agentes. Ainda assim, as dinâmicas de mudança causadas pela introdução de um novo modo de mediação são muito poderosas e costumam passar despercebidas.

Esse aspecto pode ser exemplificado pela polêmica acerca do uso de calculadoras no ensino de ciências. Muitos professores de física e matemática, por exemplo, proibem seus alunos de utilizarem a calculadora durante os exames. Embora eles raramente formulem nesses termos, a razão pela qual o uso dessa ferramenta cultural é proibido pelos professores resulta do fato de que a calculadora não facilita simplesmente uma forma de operação mental já existente. Pelo contrário, ela cria – ou a transforma em – uma forma de ação totalmente nova.

## Delineamento do estudo

Esse estudo foi desenvolvido junto a uma disciplina introdutória de física moderna oferecida no quinto semestre de um curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Essa disciplina representa o primeiro contato dos estudantes com a teoria da mecânica quântica e equivale à disciplina de Introdução à Física Quântica, oferecida na maioria dos cursos de Bacharelado em Física do Brasil. Sua ementa inclui temas como a origem da física quântica, os modelos atômicos, o princípio da incerteza, a equação de Schrödinger e aplicações em uma dimensão. A dinâmica das aulas é basicamente constituída de aulas expositivas de quadro e giz. Os alunos receberam a cada semana uma lista de problemas contendo um resumo do conteúdo a ser discutido em aula. O conjunto dessas listas (dezesseis no total) constitui o único material de apoio efetivamente adotado na disciplina<sup>2</sup>.

Em julho de 2009, os estudantes foram submetidos a um estudo conduzido em um laboratório de pesquisa em ensino de física. A tarefa consistiu na resolução de um teste, do tipo papel e lápis, formulado pelo próprio professor da disciplina. Essa atividade foi realizada no final do semestre letivo, quando todos os conteúdos já haviam sido contemplados. Essa tarefa serviu como terceira avaliação da disciplina, correspondendo a um terço da nota final dos estudantes. O teste era constituído de uma questão conceitual sobre o formalismo da mecânica quântica e um problema de aplicação da equação de Schrödinger para o potencial quadrado infinito. A atividade foi realizada em pequenos grupos (duas duplas e um trio) e os estudantes foram autorizados a consultar o material de apoio da disciplina. Aos grupos foram disponibilizadas mesas equipadas com computadores com acesso a internet, microfones e gravadores de som instalados. As conversas entre os estudantes foram registradas em áudio e posteriormente transcritas para análise<sup>3</sup>. O foco da análise se manteve sobre o uso de recursos textuais como ferramentas culturais para resolver a questão conceitual.

---

<sup>2</sup> Em entrevistas individuais, os estudantes declararam ter estudado a partir de outras fontes, a saber: Tipler, P. A.; Llewellyn, R. A. *Física Moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2001 e Eisberg, R.; Resnick, R. **Física Quântica: Átomo, Molécula, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1983

<sup>3</sup> Essa atividade foi realizada a pedido dos pesquisadores. No entanto, a escolha das questões do teste ficou a critério do professor da disciplina, no intuito de minimizar a nossa intervenção nas aulas. Nossa única exigência foi que houvesse uma questão conceitual.

## Análise dos dados

Nessa seção, apresentaremos a análise dos enunciados de dois grupos de estudantes, conforme eles realizavam a tarefa. A transcrição dos enunciados foi dividida em pequenos extratos para facilitar sua análise. Os nomes dos estudantes foram alterados no intuito de preservar suas identidades, mantendo-se o gênero de cada aluno. Eventuais usos de linguagem coloquial foram mantidos para assegurar a autenticidade dos enunciados. Para designar a superposição de dois ou mais enunciados emitidos simultaneamente, utilizou-se um pequeno espaçamento de linha. As leituras em voz alta são indicadas em itálico e entre aspas. A análise apresentada nesse trabalho centrou-se na seguinte questão:

“Considere, no contexto da mecânica quântica, os seguintes conceitos: estado; representação de estado; operadores; auto-valor e auto-vetor (ou auto-função). Em que estes conceitos se diferenciam quando consideramos a mecânica quântica e a mecânica clássica? Exemplifique”.

### Os diálogos entre Raquel e Rosane

Após o início da atividade, Rosane leu em voz alta o enunciado da questão. Em seguida, as estudantes deram início ao seguinte diálogo.

#### Extrato 01: em busca de um recurso textual

01. Rosane: Putz.
02. Raquel: Do 11 ao 76. É aquelas primeiras lá.
03. Rosane: Não, eu acho que é aquela primeira de mecânica quântica. Pacotes de onda.
04. Tratamento formal, eu acho, dos sistemas físicos.
05. Raquel: É a 9?
06. Rosane: 9!
07. Raquel: Ah, tem aqui. *“Um estado é uma forma abstrata de representação das propriedades físicas de um sistema em função do tempo. Às leis da física compete ‘regular’ como o sistema evolui de um estado a outro, com o passar do tempo. Por outro lado, variáveis que são bem determinadas na mecânica clássica, são substituídas, na mecânica quântica, por grandezas cuja determinação está associada a uma interpretação probabilística da natureza. Isto porque, no mundo quântico nos deparamos com aspectos que são essencialmente distintos daqueles encontrados no mundo clássico”.*
- 08.
- 09.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.

O extrato acima se caracteriza pela busca de uma fonte textual adequada para a resolução do problema em questão. A presença de termos não-familiares à mecânica ondulatória como estado, representação de estado e autovetor, no enunciado da questão, serviu como base para a escolha da lista de problemas 9 (linhas 3-6). Essa lista apresenta uma síntese do tratamento formal da mecânica quântica, abordando de forma sucinta os conceitos de estado, representação de estado, superposição de estados, notação bra-ket, evolução temporal, observáveis, operadores, valores esperados e o operador hamiltoniano. Conforme veremos mais adiante, o trecho escolhido por Raquel (linhas 7-13) moldará o discurso das estudantes durante quase toda a atividade.

#### Extrato 02: recursos, restrições e conflito

14. Raquel: Eu acho, pelo que eu tô vendo aqui, que a diferença é que, tipo, a mecânica clássica ela
15. te dá as informações, tipo, direta, assim, tá tudo bem definido. Enquanto que
16. mecânica quântica, ela te dá uma interpretação probabilística disso. Porque tu não

17. tem mais, enfim, tudo bem definido.
18. Rosane: Mas a gente precisa, será, comparar cada um assim ou fazemos tudo geral?
19. Raquel: Acho que a gente pode fazer geral porque se a diferença de todos for essa...
20. Rosane: Vê se a representação de estados... Tá, tá aqui. Operadores, autovalor e autovetor.
21. Raquel: Aqui, ó. *“Grandezas observáveis e operadores... Na mecânica quântica não é possível determinar com precisão absoluta a posição de uma partícula devido à presença de efeitos ondulatórios”*. Então, tipo, tudo, tudo é mais ou menos isso.
- 22.
- 23.
24. Rosane: Hum hu. É, também tem aqui, ó. *“Operadores... Na mecânica quântica, tratamos de fato com operadores matemáticos, pois é através da aplicação de um operador matemático à função de onda que é possível gerarmos um autovalor correspondente”*.
- 25.
- 26.
27. Hum... *“Alguns exemplos... valores esperados...”*. Não tem, não é bem isso que ele quer, né? Acho que é só pra dizer, então, isso né, que a gente tem que falar. Que
28. devido a... tu vê!
- 29.

Na fala de Raquel (linhas 14-16), é possível observar o emprego da dicotomia “determinismo-probabilismo” para estabelecer a diferença entre as visões de mundo clássica e quântica. De um lado, a estudante coloca a ideia de que (em princípio) todas as variáveis em física clássica podem ser determinadas, ou seja, “tá tudo bem definido” (linha 15). De outro lado, a estudante destaca o fato de que a mecânica quântica “te dá uma interpretação probabilística” (linha 16) da natureza. Embora esta seja uma forma consistente de estabelecer uma demarcação entre a física clássica e a mecânica quântica, a explicação de Raquel não inclui os conceitos de estado, representação de estado, operadores, autovalor e autovetor (ou autofunção). Essa restrição<sup>4</sup>, associada à explicação utilizada por Raquel, fez com que a mecânica quântica fosse descrita em termos de seus aspectos gerais, sem incluir os conceitos específicos descritos no enunciado da questão. Isso mostra como certas “explicações textuais” destacam alguns aspectos relevantes do problema em questão, ao mesmo tempo em que ignoram outros aspectos, que podem estar presentes em outras explicações.

De acordo com Raquel, essa caracterização minuciosa não seria necessária já que “tudo é mais ou menos isso” (linha 23). Rosane, por outro lado, manteve-se insatisfeita com a explicação de Raquel e partiu em busca de uma explicação que envolvesse os conceitos de representação de estados, operadores, autovalor e autovetor (linha 20). É importante destacar que o objetivo associado à lista 9 consiste em introduzir sucintamente os conceitos associados ao formalismo matemático e não estabelecer uma distinção rigorosa entre os significados desses conceitos no contexto da física clássica e da mecânica quântica. Esse conflito entre os objetivos imediatos de Rosane e os propósitos associado à fonte textual utilizada impossibilitou que a estudante formulasse uma resposta adequada ao problema em questão (linhas 24-29), levando-a a uma solução que não corresponde exatamente à explicação esperada pelo professor, ou seja, “não é bem isso que ele quer” (linha 27-28). É importante destacar que esses dois objetivos mencionados acima se aplicam a “ação” (e.g. resolver problemas) e não aos textos de apoio ou aos estudantes isoladamente. É preciso analisar como agentes e ferramentas culturais operam em conjunto.

### **Extrato 03: articulação entre textos explicativos**

30. Raquel: Então tem que dizer isso, que na mecânica quântica, que então seria o mundo do
31. muito pequeno, falar alguma coisa desse gênero. A gente não tem mais uma, tipo,

---

<sup>4</sup> É importante notar que a noção de “restrição”, conforme usada em nossa análise, não deve ser confundida com *erro*. O objetivo central desse estudo é analisar como recursos textuais moldam as explicações dos estudantes e não analisar os erros nas explicações dos mesmos.

32. tudo gira em torno das probabilidades. A gente não tem mais uma, tipo, a posição e  
 33. tal, bem definidas.  
 34. Rosane: É, a principal diferença seria que, tipo, na clássica está tudo bem estabelecido e na  
 35. quântica tu trabalha com uma idéia de probabilidade.  
 36. Raquel: *“variáveis que são bem determinadas na mecânica clássica... mecânica quântica,*  
 37. *substituídas por grandezas cuja determinação está associada a uma interpretação*  
 38. *probabilística da natureza”.*

No extrato acima, é possível ver a tensão irreduzível entre as estudantes e as fontes textuais que elas empregam. O trecho do texto de apoio escolhido pelas estudantes como ponto de partida segue moldando fortemente suas explicações conforme elas formulam suas respostas. Um importante aspecto desse diálogo é o fato de que as estudantes parecem empregar a dicotomia determinismo-probabilismo em combinação com a explicação geral do princípio da incerteza, que afirma que é *impossível determinar simultaneamente a posição e o momentum linear de um determinado objeto quântico com precisão absoluta*. De acordo com Raquel e Rosane, diferentemente da física clássica, onde “está tudo bem estabelecido” (linha 34), na mecânica quântica “tudo gira em torno das probabilidades. A gente não tem mais uma, tipo, a posição e tal, bem definidas” (linhas 32-33).

Outro aspecto a ser destacado é o fato de que Rosane adotou a explicação empregada por Raquel, considerando apenas os aspectos gerais da mecânica quântica e não os conceitos específicos apresentados no enunciado da questão. Isso provavelmente se deve ao fato de os textos explicativos disponíveis no contexto da atividade não se mostrarem adequados para diferenciar as visões de mundo clássica e quântica a partir das noções de operadores, autovalor e autovetor.

#### **Extrato 04: introduzindo um novo recurso textual**

39. Raquel: A gente pode dizer que tem a mecânica clássica, tu tem a mecânica quântica e tu tem a  
 40. dualidade, né. Tu tem a onda-partícula. Então, pelo princípio da complementaridade,  
 41. tipo *“os aspectos de partícula e ondulatórios da matéria são complementares uns aos*  
 42. *outros uma vez que ambos os aspectos são necessários para compreendermos as*  
 43. *propriedades e a natureza da matéria...”.*  
 44. Rosane: Espera aí, mas em física clássica tem que...  
 45. Raquel: *“... mas ambos aspectos não podem ser simultaneamente*  
 46. *observados com precisão absoluta”.*  
 47. Rosane: E na física clássica, ou é onda ou é partícula.  
 48. Raquel: Ou é partícula. É. E daí não tem essa dualidade. Por isso  
 49. que vai existir essa probabilidade, porque tu não tem uma definição, né. Tu não pode  
 50. determinar a...

Nesse extrato, Raquel introduziu uma nova explicação para demarcar a distinção entre a física clássica e a mecânica quântica. Essa nova explicação inclui a dualidade onda-partícula e está relacionada com a explicação sobre princípio da complementaridade (linha 40). O trecho do material de apoio que serviu como mediação textual encontra-se na lista 8 (linhas 41-43 e 45-46). A idéia geral é de que a diferença entre essas duas teorias pode ser descrita basicamente em termos da afirmação de que “na física clássica, ou é onda ou é partícula” (linha 47), enquanto que na mecânica quântica “tu tem a dualidade” (linhas 39-40).

Mais uma vez, as estudantes conseguiram estabelecer um critério de demarcação entre a física clássica e a mecânica quântica. Apesar disso, ainda que o argumento de Raquel tenha se estruturado em bases totalmente novas, a distinção entre as duas

teorias se manteve formulada em termos de aspectos gerais e não em termos de conceitos específicos. A nova explicação também não inclui as noções de estado, representação de estado, operadores, autovalor e autovetor (ou autofunção). Outra restrição associada a esse novo recurso textual é o fato de que a relação entre a dualidade onda-partícula e o caráter probabilístico da teoria quântica não parece tão óbvia como no caso da explicação baseada no princípio da incerteza. Em função disso, Raquel finalizou seu discurso de maneira muito confusa, afirmando que na física clássica “não tem essa dualidade. Por isso que [na mecânica quântica] vai existir essa probabilidade, porque tu não tem uma definição, né. Tu não pode determinar a...” (linhas 48-50).

### Extrato 05: transparência dos textos explicativos

51. Rosane: Tu quer tentar escrever?  
 52. Raquel: Hum... Só não sei como começar.  
 53. Rosane: Pois é, eu também tô pensando nisso... Quem sabe, a gente podia começar mais ou  
 54. menos assim, ó. Tentar mudar isso aqui um pouco, mas botar mais ou menos isso:  
 55. *“variáveis que são bem determinadas em mecânica clássica, são substituídas em*  
 56. *mecânica quântica por grandezas cuja determinação está associada a uma*  
 57. *interpretação probabilística da natureza”*. E aí, a gente podia começar a falar meio  
 58. geral assim...  
 59. Raquel: Dualidade.  
 60. Rosane: É. E também tentar botar um pouquinho de estado, sei lá, se der.

A primeira parte desse diálogo (linhas 51-53) mostra a dificuldade das estudantes em formular uma resposta adequada ao problema. O fato delas não saberem “como começar” (linha 52) a atividade reforça a ideia de que tanto a dualidade onda-partícula como a dicotomia “determinismo-probabilismo” restringem a solução do problema em questão, embora ambas sirvam para estabelecer uma clara demarcação entre a física clássica e a mecânica quântica. Conforme podemos ver no extrato acima, esses dois aspectos da teoria quântica continuaram exercendo uma forte influência sobre o restante do discurso das estudantes, conforme mostra os enunciados de Rosane e de Raquel (linhas 55-59).

O que essa análise sugere é que os textos explicativos disponíveis no contexto sociocultural parecem ser usados com pouca ou nenhuma reflexão consciente. Inicialmente, as estudantes selecionaram a explicação que elas julgaram ser a mais adequada para utilizar no contexto da atividade. Apesar disso, suas respostas se mantiveram formuladas em termos dos aspectos gerais da teoria quântica. A sugestão de Rosane de “tentar botar um pouquinho de estado” (linha 60) representa sua última tentativa de incluir, na solução do problema, os conceitos específicos apresentados no enunciado da questão.

### Extrato 06: transformação do discurso

61. Rosane: A diferença também é representação de estado. Uma função complexa.  
 62. Raquel: Ah, é verdade.  
 63. Rosane: Que na clássica não é.  
 64. Raquel: É, né, porque a gente tava ali na aula da Teca, daí, tipo, quando tu chega numa...  
 65. Rosane: Numa resposta imaginária é porque tu não consegue repetir, né?  
 66. Raquel: Tu não consegue, na verdade ela não está presente no mundo real, que a gente está  
 67. vivendo, né. Daí a gente pode, a gente pode dar esse exemplo mesmo. Aqui, ó: *“um*  
 68. *estado é uma forma abstrata de representação das propriedades físicas de um sistema*  
 69. *em função do tempo”*. Na mecânica clássica ele é representado por uma função real.  
 70. Na mecânica quântica, ele é representado por uma função complexa... A gente podia  
 71. então começar com, não sei, tipo, a mesma coisa que diz aqui nessa parte que as  
 72. regras e princípios, elas existem, digamos, para tentar descrever como o sistema  
 73. evolui.  
 74. Rosane: É, pode ser.  
 75. Raquel: *“De um estado pra outro com o passar do tempo”*.

No início do extrato anterior, Rosane resolveu abordar o problema em termos da noção de representação de estado. Essa nova explicação aproximou as estudantes dos conceitos específicos apresentados no enunciado do problema. A inclusão de representação de estados teve como base a terceira seção do texto apresentado na lista 9. Essa seção define duas formas de representar o estado de um sistema

microscópico dentro do formalismo matemático da mecânica quântica: (1) através de uma função de onda complexa; (2) através de um vetor em um espaço vetorial complexo. A idéia geral é que o estado de um sistema macroscópico, em física clássica, “é representado por uma função real” (linha 69), normalmente da posição em função do tempo, enquanto que na “mecânica quântica, ele é representado por uma função complexa” (linha 70), sendo esta a função de onda. De acordo com o depoimento das estudantes, a presença do número imaginário na função de onda está associada ao fato de que ela “não está presente no mundo real” (linha 66).

Apesar de a resposta final ao problema não incluir os conceitos de operadores, autovalor e autovetor, essa abordagem permitiu uma descrição do problema em termos da evolução temporal do estado de um sistema quântico, atribuindo às regras e aos princípios físicos (nesse caso, a equação de Schrödinger) o papel de “descrever como o sistema evolui” (linha 72-73) de “um estado para outro com o passar do tempo” (linha 75).

## Os diálogos Marcelo e Diego

Após resolver o problema referente à aplicação da equação de Schrödinger para um elétron preso em um potencial quadrado infinito, Marcelo e Diego partiram para a resolução da questão apresentada no início da presente seção. Após a leitura em voz alta do enunciado da questão, realizada por Marcelo, os estudantes deram início ao seguinte diálogo.

### Extrato 07: recursos, restrições e conflito

01. Diego: Eu escrevi como ele é representado, não como... É, não qual é a diferença desse...
02. Desse estado pro... Do estado quântico pro estado clássico. Isso eu não expliquei. Eu só
03. considerei...
04. Marcelo: Pois é, aí a questão é que essa notação complexa, ela só tem sentido quando a gente
05. pega o quadrado disso aí, né. E esse quadrado, ele, ele vai te dar uma probabilidade de
06. um negócio.
07. Diego: Hum hu.
08. Marcelo: Aí, não é totalmente determinista como na clássica, né.
09. Diego: É.
10. Marcelo: Que se tu sabe o estado inicial, tu vai saber o final.
11. Diego: Sim
12. Marcelo: Aí nesse caso, não.
13. Diego: como é que eu expresso?
14. Marcelo: Pois é, isso aí é difícil, né, da gente escrever.
15. Diego: Então.
16. Marcelo: Vamos ver como é que ficou o final aí, ou o estado, pode ser?

No extrato anterior, Marcelo também utilizou a dicotomia “determinismo-probabilismo” para diferenciar as visões de mundo clássica e quântica. Porém, diferentemente da explicação de Raquel e Rosane, que teve como base o princípio da incerteza, a explicação de Marcelo se apoiou no postulado de Max Born, que afirma que o quadrado do módulo da função de onda representa a probabilidade de se encontrar o objeto quântico em uma determinada região do espaço. Assim, como no caso de Raquel e Rosane, a explicação de Marcelo representa uma forma consistente de estabelecer uma demarcação entre essas duas teorias. O fato de que “essa notação complexa [...] só tem sentido quando a gente pega o quadrado disso” (linhas 04-05) e

que “esse quadrado [...] vai te dar uma probabilidade” (linha 05) mostra que a física quântica “não é totalmente determinista como na clássica” (linha 08).

Apesar disso, essa explicação de Marcelo não inclui os conceitos de estado, operadores, autovalores e autovetores, embora mencione “a notação complexa” (linha 04) como uma forma de representação do estado. Essa restrição parece ser o resultado do conflito entre dois objetivos simultâneos associados à tarefa: (1) estabelecer uma demarcação entre a física clássica e a mecânica quântica; (2) definir os conceitos apresentados no enunciado da questão. Assim como no caso das meninas, o desafio dos estudantes, portanto, consiste em empregar um texto explicativo que contemple essas duas necessidades de maneira mais eficiente.

### Extrato 08: recursos, restrições e transparência da linguagem

17. Marcelo: Sei lá, vai lá! A questão é que essa notação complexa, hum, só pode ser medida
18. quando tomamos o quadrado da função...
19. Diego: [escrevendo] Função... o quadrado... o quadrado da...
20. Marcelo: Não, da função...
21. Diego: [escrevendo] Da função ou o produto...
22. Marcelo: É. Bra-Ket.
23. Diego: [escrevendo] Da função de onda...
24. Marcelo: Dos autovetores Bra-Kets.
25. Diego: [escrevendo] Dos autovetores... Isto dando uma probabilidade.
26. Marcelo: É, o que nos dá a probabilidade de encontrarmos a partícula naquele estado físico.
27. Diego: Partícula? Quer dizer, não é partícula. É...
28. Marcelo: O sistema.
29. Diego: O sistema.
30. Marcelo: O sistema.
31. Diego: [escrevendo] De encontrar o sistema...
32. Marcelo: Em um dado estado. Daí convém a gente determinar o que é o estado. Aí, quem sabe,
33. entre parênteses a gente escreve. Entre parênteses a gente podia por, ó, hum... Um
34. determinado estado quântico é um estado, vamos supor, com determinadas
35. características físicas ou propriedades particulares com determinadas, com certas ou
36. determinados...
37. Diego: Propriedades físicas.

No extrato acima, os estudantes continuaram empregando a explicação geral do postulado de Born para responder à questão. Essa explicação permitiu que os estudantes se aproximassem dos conceitos de “estado” (linha 26), representação de estado, a partir das noções de “função de onda” (linha 23) e “Bra-Kets” (linha 22), e autovetores (linha 24), embora eles não tenham deixado claro que tipo de relação semântica esses conceitos deveriam implicar. Apesar dos recursos mencionados até aqui, o postulado de Born em si não fornece nenhuma definição precisa do que venha a ser o estado quântico. Essa restrição teve como resultado a afirmação confusa de que um “determinado estado é um estado, vamos supor, com determinadas propriedades características físicas ou propriedades particulares com determinadas, com certas ou determinados...” (linhas 34-36).

Outro aspecto notável no extrato acima é a objeção de Diego com relação ao uso do termo *partícula*. Ele pareceu bastante convicto de que o ente quântico, ao qual o postulado de Born se refere, “não é [uma] partícula” (linha 27). Nesse sentido, é como se ele estivesse simplesmente dizendo “como as coisas são” e não “como elas são explicadas por um determinado grupo”. Essa falta de consciência da mediação textual é uma consequência da “transparência” (WERTSCH, 2002) da linguagem. Embora seja possível

para outros indivíduos, com diferentes visões de mundo, detectar as vozes por trás de sua fala, Diego pareceu bastante inconsciente delas. A saída de Marcelo em adotar o termo “sistema” (linha 28), ao invés de partícula, permitiu que os estudantes avançassem na atividade sem ter que se comprometer com alguma interpretação particular.

### **Extrato 09: transformação do discurso**

38. Marcelo: Melhor se nós falar do estado em física clássica  
39. Diego: Ah, sim, sim. Isso.  
40. Marcelo: A princípio, uma autofunção ou um autovetor como...  
41. Diego: [escrevendo] Na mecânica clássica... [falando] Isso é... Isso é  
42. mecânica quântica, né. [escrevendo] Na mecânica clássica...  
43. Marcelo: Um autovetor ou autofunção já nos dão então o estado...  
44. Diego: [escrevendo]: Um autovetor ou uma autofunção...  
45. Marcelo: Nos possibilita saber, ressalta esse ‘saber’, a partir de um estado fundamental, todos os outros estados que o sistema vai ter.  
46. Diego: ‘Precisa’. Precisa o estado... ‘Informa’.  
47. Marcelo: Informa, a partir do conhecimento do estado fundamental, todos os outros estados.  
48. Acho que fica bom se a gente botar um exemplo disso. Assim, por exemplo, se a gente souber a posição e a velocidade inicial...  
49. Diego: Sem... Sem nenhuma incerteza. Né? Eu sei que fica estranho. Incerteza associada. Tá, e agora...  
50. Marcelo: Quem sabe vamos escrever, né, se a gente souber a velocidade e a posição inicial de uma partícula, a gente determina todas as outras posições. Ah, esse exemplo fica bom.  
51. Esse exemplo fica bom porque dá pra gente falar o que aconteceria numa situação quântica do mesmo exemplo.  
52. Diego: Ta, mas a posição e a velocidade de uma partícula... [escrevendo] Na mecânica clássica... podemos prever...  
53. Marcelo: A trajetória, por exemplo.  
54. Diego: [escrevendo] Prever a trajetória... a trajetória. Na mecânica quântica...  
55. Marcelo: Já na mecânica quântica, não sabemos o estado inicial, por exemplo, a gente não pode saber a posição e a velocidade com precisão. Então, já dá...  
56. Diego: [escrevendo] Como ‘medir’... simultaneamente... a posição e a velocidade.  
57. Marcelo: A posição e a velocidade da partícula.  
58. Diego: Não podemos ‘determinar’.  
59. Marcelo: É isso aí. Ficou muito bom.

Ao invés de caracterizar o conceito de estado a partir de uma definição geral (entre parênteses como Marcelo havia pretendido), os estudantes mudaram de estratégia, apresentando separadamente os significados desse conceito no contexto da física clássica e da mecânica quântica. De acordo com estudantes, a mecânica clássica se caracteriza pelo fato de que é possível determinar, “a partir de um estado fundamental, todos os outros estados que o sistema vai ter” (linhas 45-46). Essa explicação, baseada na dicotomia “determinismo-probabilismo”, foi empregada em combinação com a explicação do princípio da incerteza. O argumento de Marcelo é que “se a gente souber a velocidade e a posição inicial de uma partícula, a gente determina todas as outras posições” (linhas 53-54). “Já na mecânica quântica, não sabemos o estado inicial” (linha 61) porque “a gente não pode saber a posição e a velocidade com precisão” (linhas 61-62).

O uso das noções de posição e velocidade para definir o conceito de estado em física clássica permitiu que os estudantes fornecessem uma explicação do “que aconteceria numa situação quântica do mesmo exemplo” (linhas 55-56). A introdução desses elementos no discurso causou uma transformação fundamental na ação, aproximando

a resposta dos estudantes aos dois objetivos associados à tarefa (diferenciar as teorias clássica e quântica e, simultaneamente, explicar os conceitos de estado, representação de estado, operadores, autovalor e autovetor).

### Extrato 10: tomada de consciência da mediação textual

67. Diego: Tá. E agora? Operadores a gente não falou. Autovalores também.  
 68. Marcelo: A ideia é juntar nisso. Um. Dois...  
 69. Diego: Tá, os operadores, só tem operadores clássicos.  
 70. Marcelo: São os mesmos, né.  
 71. Diego: É?  
 72. Marcelo: Isso aqui ó, essa equação de Schrödinger aqui é basicamente o operador Hamiltoniano  
 73. que a gente aprende. Na verdade, eu não aprendi, mas o pessoal aprende em Clássica  
 74. II.  
 75. Diego: Hum...  
 76. Marcelo: A questão tá nesse ‘hagazinho’ que aparece aí.  
 77. Diego: [escrevendo] Os operadores... [falando] Os operadores clássicos são os mesmos?  
 78. Marcelo: São.  
 79. Diego: É... [escrevendo] Os operadores...  
 80. Marcelo: Vamos ver como é que acabou. Acho que dá pra gente fazer, criar um texto só, talvez.

No diálogo acima, os estudantes começaram a organizar uma estratégia para incluir em sua resposta os conceitos de operadores e autovalores. Um aspecto marcante da fala de Marcelo é sua afirmação de que os operadores clássicos “são os mesmos” (linha 70) presentes no formalismo da mecânica quântica. Essa afirmação tem como base a explicação de que “essa equação de Schrödinger aqui é basicamente o operador hamiltoniano” (linha 72).

É importante salientar que Diego e Marcelo nunca estudaram a formulação de Hamilton da mecânica clássica. Essa disciplina está presente apenas no currículo do curso de Bacharelado em Física e é provável que Marcelo tenha se apropriado dessa explicação a partir de conversas com amigos do bacharelado ou através de comentários do professor em sala de aula. Nesse caso, o processo de mediação textual parece ocorrer de forma consciente, já que o próprio Marcelo reconhece a presença de outras vozes no seu enunciado quando afirma que “na verdade, eu não aprendi, mas o pessoal aprende em Clássica II” (linhas 73-74).

### Extrato 11: transformação do discurso

81. Marcelo: É, que quem age nessa mudança de um estado pro outro é o operador, né. Então essa  
 82. indeterminação é causada pelo tipo de operador que tá agindo.  
 83. Diego: Tá, repete.  
 84. Marcelo: Como a transição de um estado para outro se dá através desse, do operador...  
 85. Diego: [escrevendo] De um estado para outro...  
 86. Marcelo: Se dá pela ação dos operadores...  
 87. Diego: Acho que matematicamente falando, né.  
 88. Marcelo: É, matematicamente falando.  
 89. Diego: [escrevendo] A função dos operadores...  
 90. Marcelo: Entre parênteses. Vamos explicar já o autovalor e autofunção.  
 91. Diego: É?  
 92. Marcelo: É. Que nos vieram com a função, autofunção do operador. Tu aplica o operador na  
 93. função de onda e ele te gera um autovalor.

Ao analisar os operadores no contexto da mecânica quântica, Marcelo fez confusão entre as noções de “operador unitário de evolução” e “operador auto-adjunto”. Inicialmente, os operadores são vistos como os agentes responsáveis pela “transição

de um estado para outro” (linha 84) nos sistemas físicos. A seguir, Marcelo empregou outra explicação para lidar com o conceito de operador. Nessa nova explicação, aplica-se “o operador na função de onda e ele te gera um autovalor” (linhas 92-93).

É interessante notar que os estudantes consideraram o conceito de operador como pertencente apenas ao formalismo matemático, ou seja, sua ação nos sistemas físicos ocorre apenas “matematicamente falando” (linhas 87). Apesar de não relacionar a noção de operador (auto-adjunto) com as variáveis dinâmicas do sistema físico em questão, a explicação de Marcelo permitiu que os estudantes incluíssem as noções de “autovalor e autofunção” (linha 90) na resposta, reestruturando-a e refinando-a conforme eles progrediam na atividade.

### **Extrato 12: a conformação na mediação textual**

94. Marcelo: *“De um estado para outro se dá em função dos operadores que, aplicado às funções*  
95. *de onda, nos gera aos autovalores correspondentes”*. *Aí a questão é que, na clássica,*  
96. *esses operadores são... são clássicos.*  
97. Diego: *Clássicos? Esses operadores geram autovalores determinados. [escrevendo] Os*  
98. *operadores... geram... autovalores...*  
99. Marcelo: *E, na mecânica quântica, o que eles geram são os valores esperados.*  
100. Diego: *Os autovalores...*  
101. Marcelo: *Não, os valores esperados.*  
102. Diego: *Os operadores geram os valores... ?*  
103. Marcelo: *Ou auto... É, só pra falar de valores esperados. O valor esperado dá bem uma noção,*  
104. *né, que é mais ou menos o que tu espera por alguma coisa.*  
105. Diego: *Esperados... Com incerteza associada.*

Ao tentar lidar com a noção de operadores em física clássica, os estudantes usaram a explicação geral do princípio de incerteza. De acordo com Diego, “esses operadores geram autovalores determinados” (linha 97), no sentido de que não há incerteza associada a esses valores. Isso mostra o esforço dos estudantes em definir o conceito de operador e, ao mesmo tempo, diferenciar esse conceito no contexto da física clássica e da mecânica quântica.

O mais surpreendente no extrato acima, no entanto, é a inclusão da noção de “valores esperados” (linha 101) na explicação dos estudantes sobre os operadores. Apesar da inconsistência com os textos científicos, a presença desse conceito na resposta dos estudantes se deve provavelmente ao fato de que, na formulação de Schrödinger, os operadores são tipicamente introduzidos a partir do cálculo do valor esperado do momentum linear. Isso pode ter os levado a pensar que a explicação dos operadores em mecânica quântica deve necessariamente envolver a noção de valor esperado. A afirmação de Marcelo de que “o valor esperado dá bem uma noção, né, que é mais ou menos o que tu espera por alguma coisa” (linhas 103-104), além de outras evidências encontradas nos enunciados dos estudantes, mostra que eles ainda não dominam os textos explicativos “oficiais” da mecânica quântica.

## **Considerações Finais**

Nesse trabalho, procuramos destacar o papel da mediação textual na realização de uma tarefa sobre mecânica quântica, analisando como estudantes de um curso de Licenciatura em Física utilizam recursos textuais para moldar suas explicações. Assumimos o pressuposto de que a aprendizagem de teorias científicas tais como a

mecânica quântica pode ser descrita em termos do domínio de textos explicativos da ciência, fornecidos por outros. Esses textos podem ser orais ou escritos e especificam a relação entre os fenômenos propriamente ditos e o nosso entendimento sobre eles.

Os resultados de nossa análise mostraram que as primeiras explicações utilizadas pelos estudantes baseavam-se na dicotomia “determinismo-probabilismo”, ora em combinação com a explicação geral do princípio da incerteza, ora em combinação com o postulado de Max Born. Essas abordagens, embora consistentes com a tarefa em questão, ofereceram sérias restrições aos estudantes ao impossibilitá-los de formular suas respostas em termos dos conceitos presentes no enunciado do problema. Para contornar essa restrição, as duplas de estudantes adotaram estratégias distintas: Raquel e Rosane destacaram o princípio da incerteza, a dualidade onda-partícula e a função de onda complexa; Marcelo e Diego abordaram o postulado de Born, o princípio de incerteza e o postulado de definição dos operadores em mecânica quântica. Essa introdução de novos textos explicativos na resolução da questão permitiu que os estudantes subvertessem suas respostas e se aproximassem cada vez mais de uma explicação mais completa e adequada ao problema.

Nesse processo, Marcelo e Diego conseguiram incluir em sua resposta um número maior de conceitos exigidos no enunciado do problema. Isso porque eles usaram os textos explicativos disponíveis no contexto institucional em questão de maneira muito mais livre e independente. Já Raquel e Rosane ficaram mais “presas” ao material de apoio fornecido pelo professor, o que resultou num desempenho muito mais “engessado” por parte das meninas.

A maior parte das restrições observadas nos diálogos entre os estudantes está associada ao desajuste entre os objetivos imediatos dos estudantes, que consiste em diferenciar as visões de mundo clássica e quântica fazendo uso dos conceitos exigidos no enunciado da questão, e os propósitos associados aos textos de apoio usados como recursos textuais. Esse conflito de objetivos fez com que a tarefa em questão estivesse muito além da capacidade dos estudantes, especialmente porque nenhum deles havia estudado formalmente a formulação de Hamilton da mecânica clássica, assim como a formulação de Dirac da mecânica quântica.

Obviamente, muitos dos trechos analisados mostraram que os estudantes ainda não dominam nem mesmo os textos explicativos da mecânica ondulatória. Ainda assim, eles foram capazes de manipular, com certo sucesso, algumas das explicações textuais da mecânica quântica. Esse processo parece ocorrer com pouca ou nenhuma reflexão consciente por parte dos estudantes. Em consequência disso, as restrições impostas pelos recursos textuais utilizados nem sempre foram detectadas por eles.

De um modo geral, a presença de textos mediadores em nossos enunciados apenas se torna perceptível quando os comparamos com recursos textuais mais adequados, empregadas por outros indivíduos em outros contextos. Desse modo, entendemos que a mediação textual é um aspecto do ensino de ciências que precisa ser explicitado. Ainda que os recursos textuais não definam mecanicamente nosso discurso, sua influência é poderosa e precisa ser reconhecida e examinada (WERTSCH, 2002). A tomada de consciência com relação aos recursos textuais que utilizamos pode ser um importante instrumento para evitarmos formas de discurso indesejáveis ou

inadequadas para certos contextos. Esse é um exercício que deveria ser fomentado no âmbito da educação em ciências.

## Agradecimentos

A segunda autora desse trabalho agradece ao apoio parcial do CNPq.

## Referências

- BAKHTIN, M. M. **The dialogic imagination: Four essays** by M. M. Bakhtin. Austin: University of Texas Press. 1981.
- BAKHTIN, M. M. **Speech genres and other late essays**. Austin: University of Texas Press. 1986.
- HACKING, I. **Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science**. Cambridge: Cambridge University Press. 1983.
- OGBORN, J.; KRESS, G.; MARTINS, I.; MCGILLICUDDY, K. **Explaining science in the classroom**. Buckingham: Open University Press. 2006.
- VYGOTSKY, L. S. **Pensamento e linguagem**. São Paulo: Martins Fontes. 1987.
- VYGOTSKY, L. S. **A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores**. 5 ed. São Paulo: Martins Fontes. 1994.
- VYGOTSKY, L. S. O método instrumental em psicologia. In: \_\_\_\_\_. **Teoria e método em psicologia**. 3 ed. São Paulo: Martins Fontes. 2004. p. 93-102.
- WERTSCH, J. V. **Vygotsky and the social formation of mind**. Cambridge: Harvard University Press. 1985.
- WERTSCH, J. V. **Voices of mind: A sociocultural approach to mediated action**. Cambridge: Harvard University Press. 1991.
- WERTSCH, J. V. **Mind as action**. Cambridge: Oxford University Press. 1998.
- WERTSCH, J. V. **Voices of collective remembering**. New York: Cambridge University Press. 2002.
- WERTSCH, J. V. Mediation. In: DANIELS, H.; COLE, M.; WERTSCH, J. V. (Eds.) **The Cambridge companion to Vygotsky**. Cambridge: Cambridge University Press. 2007, p. 178-192.

**Submetido em março de 2011, aceito em julho de 2012.**